

# 論文 若材齢コンクリートの割裂引張強度に与える水セメント比およびセメント量の影響

石川 慶典<sup>\*1</sup>・河野 博幸<sup>\*2</sup>・北村 耕平<sup>\*3</sup>・吉武 勇<sup>\*4</sup>

**要旨**：従来のマスコンクリート構造物に加えて、富配合な高強度コンクリートにおいても、体積変化に起因した初期ひび割れが生じる可能性が高い。そこで本研究では、ひび割れ抵抗性の一指標として引張強度特性を得るため、水セメント比およびセメント量を実験パラメータとした若材齢コンクリートの割裂引張強度実験を行った。その結果、低水セメント比のコンクリートほど割裂引張強度は高くなるが、同じ水セメント比ではセメント量によらず割裂引張強度は同程度となることを示した。

**キーワード**：若材齢、割裂引張強度、セメント量、水セメント比

## 1 はじめに

従来のマスコンクリート構造物に加えて、富配合な高強度コンクリートにおいても、若材齢期における自身の体積変化に起因した初期ひび割れの発生がしばしば指摘されている。初期ひび割れの制御・防止は、コンクリート構造物の耐久性向上に必要不可欠な命題である。したがって、コンクリートに作用する引張応力や、ひび割れ発生の可能性などを予め推定し、対策を施すことが重要となる。そのためには、先ずコンクリートの材料特性としてのひび割れ抵抗性、すなわち引張強度や伸び能力等を定量的に把握しておく必要がある。

ある時点においてコンクリート中に作用する引張応力が、その時の引張強度を超過するとひび割れが生じる。そこで、初期ひび割れを精度よく推定するためには、若材齢からの時系列な引張強度特性の把握が必要となる。一般的にコンクリートの圧縮強度が、セメント水比(C/W)と概ね比例関係にあることから、圧縮強度と水セメント比(W/C)を基本としたコンクリートの配合設計がこれまで行われてきた。また、

ひび割れに直接的に関与する引張強度は、圧縮強度との関係式によって整理・評価されているのが実情である。しかしながら、コンクリート中の結合材の量(セメント量)や配合(W/C)が異なれば、自ずと引張強度特性にも影響を与えるものと予想される。ひび割れ制御に適切な配合設計を行うには、これらの因子の影響度を把握しておくことが重要となる。

そこで本研究では、セメント量およびW/Cを実験パラメータとした若材齢コンクリートの割裂引張強度実験を通じて、ひび割れ抵抗性の一指標としての引張強度特性について検討を試みた。

## 2 割裂引張強度におよぼすセメント量の影響

### 2.1 実験方法

本研究では、若材齢コンクリートの引張強度の材齢変化を求めるため、直径100×高さ200mmの円柱供試体を用いて割裂引張強度実験を行った。ここで本実験計画段階において、旧JIS A 1132に推奨されていた供試体寸法が直径150mmであったことから<sup>1)</sup>、直径100mm供

\*1 山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻 (正会員)

\*2 山口小野田レミコン (株) 小野田工場長 (正会員)

\*3 山口小野田レミコン (株)

\*4 山口大学大学院 理工学研究科准教授 博(工) (正会員)

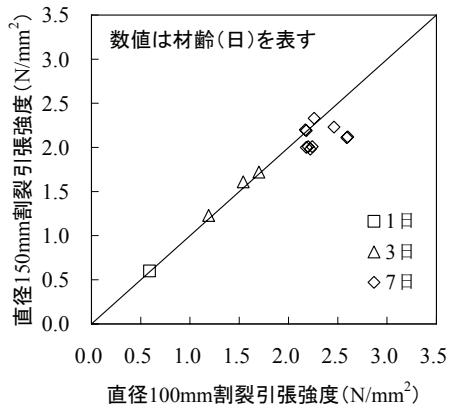


図-1 異なる直径の供試体の割裂引張強度

試体を用いた実験の妥当性について確認試験を行った。図-1に示すように、水和反応が進行し強度が発現した領域では、寸法効果も影響し直径150mmの結果が若干小さくなるが、本研究の範囲内では、寸法効果に伴う差異はあまり大きいものではなかった。そこで本研究では、同一バッチ製作で、より多くの強度データを得るよう、直径100mm供試体を用いて割裂引張強度実験を実施することとした。なお割裂引張強度のバラツキを考慮するため、一材齢における供試体数は5本とし、その最大・最小値を除いた中間平均をもって引張強度の評価を行った。

## 2.2 実験項目

本実験で使用した材料を表-1に示すとともに、配合条件を表-2に表す。本実験では、コンクリート中の結合材量、すなわちセメント量が引張強度特性におよぼす影響を求めるため、W/Cを一定(49%, 39%)にした上で、各3水準

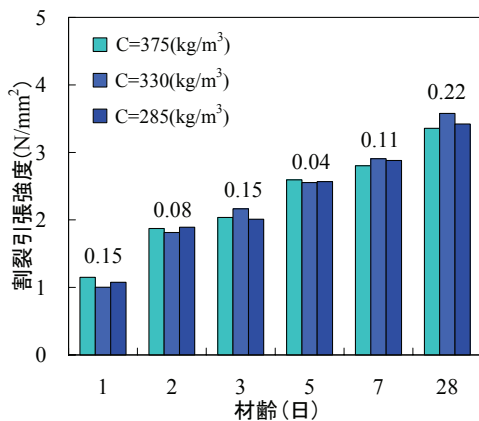


図-2 セメント量別割裂引張強度(W/C=49%)

表-1 使用材料

種類	材料名	(表乾)密度
セメント C	高炉セメント B 種	3.04g/cm <sup>3</sup>
水 W	上水道水	—
細骨材 S1	海砂	2.56g/cm <sup>3</sup>
細骨材 S2	砕砂	2.66g/cm <sup>3</sup>
粗骨材 G1	砕石 1505	2.73g/cm <sup>3</sup>
粗骨材 G2	砕石 2015	2.74g/cm <sup>3</sup>
再生骨材 RG1	再生骨材 L 1505	2.44g/cm <sup>3</sup>
再生骨材 RG2	再生骨材 L 2015	2.45g/cm <sup>3</sup>
混和剤 Ad	AE 減水剤	1.08g/cm <sup>3</sup>

表-2 異なるセメント量のコンクリート配合

W/C	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
	C	W	S1	S2	G1	G2	Ad
39%	420	163	482	321	476	475	2.23
	375	146	505	337	499	499	2.06
	330	128	530	353	522	523	1.98
49%	375	184	490	326	460	461	1.88
	330	163	517	344	486	486	1.65
	285	140	545	364	513	513	1.42

のセメント量のコンクリートを作製した。本研究では、打設後20℃室内に供試体を保管し、試験材齢1日のケースを除き、材齢2日で脱枠を行った後、標準水中養生を施した。そして、所定の材齢(1,2,3,5,7,28日：有効材齢に相当)において割裂引張強度実験を行った。

## 2.3 セメント量の影響

セメント量が異なるコンクリートの割裂引張強度を図-2, 図-3に示す。ここで、同一の配合・材齢における割裂引張強度の変動係数は、いずれも3%未満であった。なお、これらの棒グラフにおける数値は、各セメント量の引張強

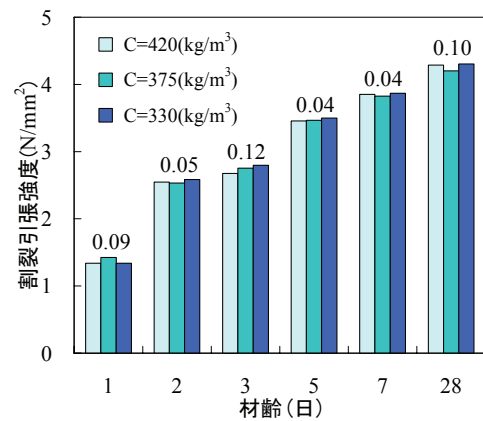


図-3 セメント量別割裂引張強度(W/C=39%)

度の最大～最小値の差(N/mm<sup>2</sup>)を表している。

これらの割裂引張強度の結果に示されるように、セメント量の多少に応じて明確な傾向はなく、いずれの材齢においてもセメント量によらず、W/C と材齢に応じて概ね一定値を示した。実験計画段階では、セメント量が少ないほど、骨材どうしの接触・非接着割合が増加することから、これが起点となって割裂引張破壊に至り強度低下を示すものと予想していたが、表-2 に示すような実用レベルの配合においては、セメント量が割裂引張強度へおよぼす影響はほとんどみられないことがわかった。

#### 2.4 再生骨材を用いた割裂引張強度実験

若材齢コンクリートにおいて、W/C に応じて割裂引張強度が一定値を示したことを確認するため、写真-1 に示す再生骨材 L および普通骨材を用いて、W/C=57%のコンクリート(表-3) を作製し、割裂引張強度の比較を試みた。

再生・普通骨材を使用したコンクリートの圧縮強度(材齢3,5,7,28日)および割裂引張強度(材齢2,3,5,7,28日)をそれぞれ図-4、図-5 に示す。なおこれらの棒グラフには、普通骨材コンクリートを基準とするときの再生骨材コンクリートの強度差(N/mm<sup>2</sup>)を併記している。

本研究で主眼とする割裂引張強度に着目すると、強度のバラツキが生じやすい材齢2日において、+0.41N/mm<sup>2</sup> と比較的大きい強度差がみられるが、以降の材齢では両者間に大きな強度差が認められない。これは若材齢期において、セメント・モルタルマトリックスの骨格構造が十分に形成していないことから、再生骨材を用いた影響がほとんど生じず、これらの水和度・強度発現に大きく支配された結果と考えられる。そのため、再生骨材コンクリートの割裂引張破壊面(写真-2)には、古モルタルを付着した粗骨材が多く残存しており、材齢7日までの若材齢期では、いずれも新モルタルとの界面で破壊に至っていたことが確認された。

以上のことより、若材齢コンクリートの割裂引張強度は、結合材(セメント)量や骨材種類の

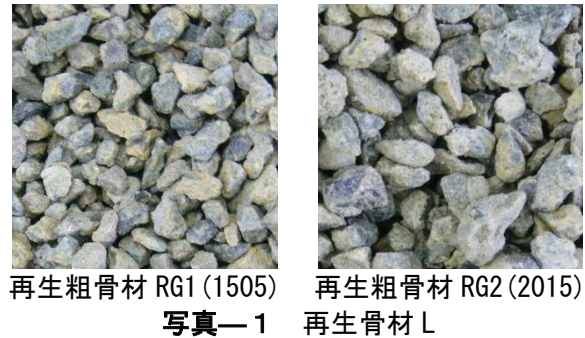


表-3 コンクリート配合(再生・普通骨材)

種類	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
	C	W	S1	S2	(R)G1	(R)G2	Ad
再生	285	163	542	362	690	172	1.71
普通	285	163	542	362	484	484	1.62

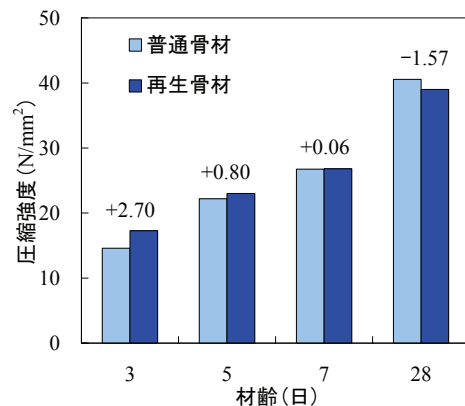


図-4 圧縮強度(再生・普通骨材比較)

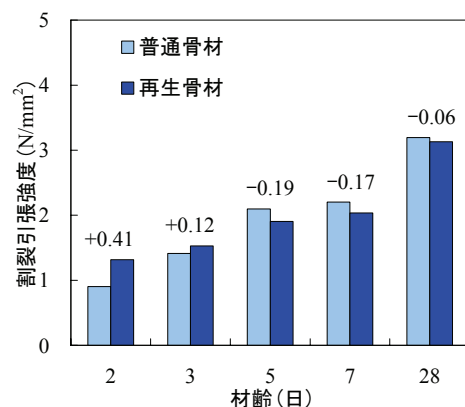


図-5 割裂引張強度(再生・普通骨材比較)

影響もあまり受けず、これを構成する結合材の強度(水和度)に強く依存することが窺えた。

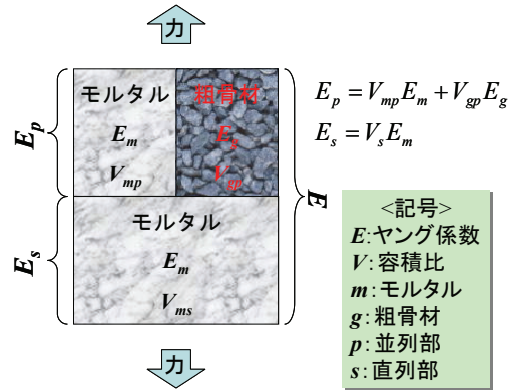
### 3 断熱温度上昇量と引張ヤング係数の推定

#### 3.1 断熱温度上昇量の推定

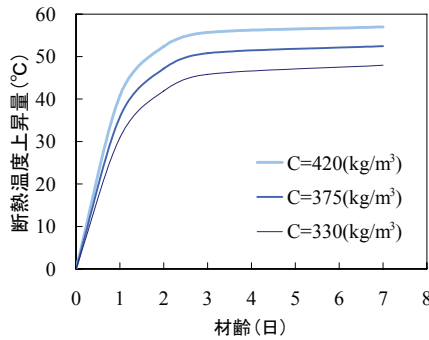
先の実験より、W/C が一定であれば、セメン



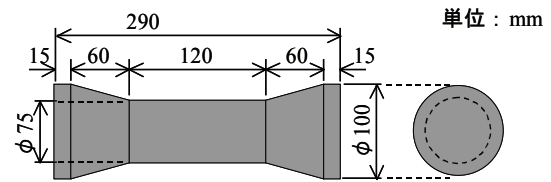
写真—2 割裂引張試験後の破壊断面例



図—7 簡易複合則理論モデル



図—6 断熱温度上昇量 (W/C=39%)



図—8 ドックボーン形供試体

表—4 引張ヤング係数実験値

材齢 (日)		1	2	3	7
ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	モルタル	19.3	24.2	27.0	30.0
	粗骨材	35(みかけのヤング係数)			

表—5 引張ヤング係数の推定値

材齢 (日)		1	2	3	7
ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	C=420	24.6	27.7	29.7	31.7
	C=375	24.9	28.0	29.9	31.9
	C=330	25.2	28.2	30.0	32.0

ト量によらず割裂引張強度が概ね等しいという結果を得た。これは、所要の引張強度を得る W/C を設定した上で、できるだけセメント量を少なくすることが、経済的な材料設計に繋がることを意味している。加えて、セメント量の多少は、コンクリートの発熱量(断熱温度上昇量)に強く関与するため、初期ひび割れ防止の観点からも、セメント量を少なくすることが肝要である。そこで本論文では、先述の実験で示した W/C=39%の3配合を例に、コンクリート標準仕方書<sup>2)</sup>に記載される下記の評価式を用いて、断熱温度上昇量の推定を試みた(図—6)。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt}) \quad (1)$$

$$Q_{\infty} = 0.10C + 15.0 \quad (2)$$

ここで、 $Q(t)$ : 材齢  $t$  日の断熱温度上昇量(°C),  $Q_{\infty}$ : 終局断熱温度上昇量(°C),  $r$ : 温度上昇速度,  $t$ : 材齢(日),  $C$ : セメント量(kg/m<sup>3</sup>)を示す。

図—6の結果に示すように、セメント量の多少に応じて、最大 10°C 程度の差異が生じており、同程度の引張強度を得る配合においても、初期ひび割れを誘引する発熱量(断熱温度上昇量)に

大きな差があることがわかる。

### 3.2 引張ヤング係数の推定

ここで本研究では、ひび割れ発生に関与する力学物性のうち、変形性能を示す引張ヤング係数に着目した。すなわち、一定の W/C で、セメント量が異なるコンクリートについて、図—7に示す簡易な複合則理論モデル<sup>3)</sup>を用いて引張ヤング係数の推定を行った(式(3)参照)。

$$\frac{1}{E} = \frac{V_p}{E_p} + \frac{V_s}{E_s} \quad (3)$$

$E$ : ヤング係数推定値,  $E_p$ : 並列部のヤング係数,  $V_p$ : 並列部の容積比,  $E_s$ : 直列部のヤング係数,  $V_s$ : 直列部の容積比, を表す。

なお、この簡易複合則理論モデルに用いるモルタルの引張ヤング係数は、図—8に示すドックボーン形供試体の一軸引張実験<sup>4)</sup>から求めた

ものであり、粗骨材に並列配置したモルタル成分は粗骨材の実積率(61.5%)に基づいて設定した。**表-4**には、本研究の引張ヤング係数の推定に用いた若材齢期(1~7日)におけるモルタル(W/C=39%, 普通セメント)の引張ヤング係数、ならびにコンクリートの一軸引張実験結果に対して同モデルを用いて推定した粗骨材の引張ヤング係数を示す。

**表-4**に示すように、若材齢期におけるモルタルの引張ヤング係数は発現途上にあり、且つ粗骨材のそれより小さいため、セメント量に応じてモルタル量が多くなると、必然的に引張ヤング係数は小さくなる。しかしながら、**表-5**に示すように、セメント量が  $100\text{kg/m}^3$  程度の差異であれば、推定される引張ヤング係数は同程度であり、セメント量が引張ヤング係数にもたらす影響は事実上無視できるレベルにあると判断されよう。すなわち、前節までに示したように、W/Cが一定であればセメント量の多少によらず(割裂)引張強度がほぼ等しいという結果を考慮すれば、コンクリートの初期ひび割れ対策として、ワーカビリティの許容範囲内でセメント量をできるだけ少なくすることが最も効果的な手段と推察される。

#### 4 W/Cの異なるコンクリートの割裂引張強度

##### 4.1 実験項目

2章において、セメント量の多少によらず、W/Cが割裂引張強度におよぼす効果が最も顕著であることを示した。そこで本章では、割裂引張強度に対するW/Cの影響を実験的に把握するため、**表-6**に示すコンクリートを作製した。なお、これらのコンクリートは、できるだけスランプが一定(8cm)となるよう、単位水量を  $163\text{kg/m}^3$  と一定にした上で、混和剤量を調整し、セメント量を  $240\sim 420\text{kg/m}^3$  まで5段階に設定したものである<sup>4)</sup>。ここで作製したコンクリートに使用した材料は、**表-1**に準じたものである。本実験では、2章と同様に5本の中間平均(3本平均)を用いて、割裂引張強度を評価

**表-6** コンクリート配合(W/C)

W/C	単位量( $\text{kg/m}^3$ )						
	C	W	S1	S2	G1	G2	Ad
39%	420	163	482	321	476	475	2.10
43%	375		498	332	482	482	2.03
49%	330		517	344	486	486	1.82
57%	285		542	362	484	484	1.62
68%	240		594	396	459	459	1.56

し、その材齢変化(1,2,3,5,7,28日)を求めた。また、割裂引張強度と対比するため、各材齢における圧縮強度(3本平均)も併せて求めた。

##### 4.2 水セメント比(W/C)の影響

水セメント比(W/C)を横軸にとった場合の、各材齢における割裂引張強度および圧縮強度の推移を**図-9**、**図-10**に示す。なお、材齢1日におけるW/C=57%、68%の割裂引張強度は、試験不能だったため、グラフより除外している。

**図-9**に示す結果より、本実験で行ったW/Cの範囲内においては、いずれの材齢においても、割裂引張強度はW/Cに対して負の勾配を有するほぼ直線的な関係を示していることがわかる。そして、この勾配は、材齢が進行してもあまり変化がなく、これらの直線関係は、材齢に応じて上方へ平行シフトするような傾向を示した。

また**図-10**に示す圧縮強度も同様に、本研究で行ったW/Cの範囲内に対して概ね線形関係式で回帰できるものであった。しかしながら、割裂引張強度と異なり、若材齢時から、材齢に応じてこれらの直線関係の勾配が徐々に大きくなる傾向がみられた。すなわち、同グラフの各W/Cにおける圧縮強度の増加が大きくなっていることが窺える。両結果の傾向の差異は、材齢に伴い水和反応が進行しても、(割裂)引張強度の増進は、圧縮強度ほど高い強度増進効果が得られないことを暗示したものといえよう。

##### 4.3 引張強度と圧縮強度

上記のような強度特性を示すことから、長期材齢コンクリートについては、その引張強度は圧縮強度の  $2/3$  乗との関係式<sup>5)</sup>をもって評価されている。若材齢コンクリートにおいても、同様の関係で表現できるものか確認するため、本

研究で求めた各強度に加え、さらに若材齢期を中心に実施した計 660 ケース (W/C=55%~65%) の割裂引張強度・圧縮強度試験結果について、**図-11** に示すような整理を試みた。

**図-11** に示す結果より、低強度域にある若材齢コンクリートにおいても、その割裂引張強度は、圧縮強度の 2/3 乗に対して、概ね比例関係を示していることがわかる。すなわち、若材齢期においてもこのような関係式をもって(割裂)引張強度を推定できることから、従来の W/C と圧縮強度に立脚したコンクリートの配合設計理論を基に、できるだけセメント量を少なくする配合を模索することが、初期ひび割れ対策としての材料設計に効果的と考えられる。

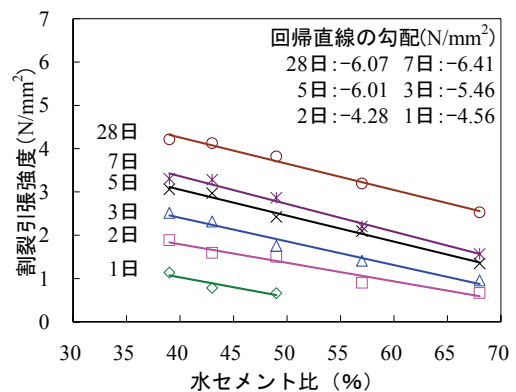
## 5 まとめ

本研究で得られた知見を以下に要約する。

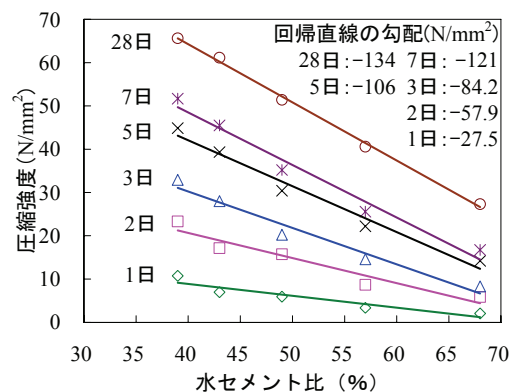
- (1) 同じ W/C のコンクリートは、若材齢期においてもセメント量によらず、概ね一定の割裂引張強度を示す。
- (2) 若材齢コンクリートの割裂引張強度は、再生骨材使用による影響はほとんど受けない。
- (3) ひび割れ抵抗性(引張強度)を確保するには、経済性・発熱特性・変形性能の観点から考慮しても、適切な W/C でセメント量をできるだけ少なくすることが望ましい。
- (4) 若材齢コンクリートの割裂引張強度は、W/C に対して直線関係にあり、その勾配は材齢によってほとんど変化しない。また、圧縮強度の 2/3 乗に概ね比例する。

## 参考文献

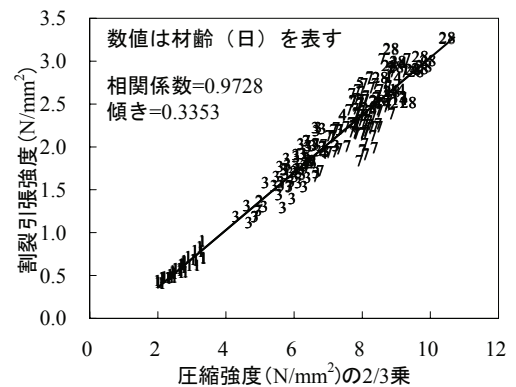
- 1) コンクリート試験方法 JIS 原案作成委員会：新たに制定・改正されたコンクリート試験方法 JIS について、コンクリート工学, Vol.44, No.11, pp.10-14, 2006.11.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，2002.3.
- 3) 山口佳起, 吉武 勇, 田中 浩, 浜田純夫：人工軽量骨材を組み合わせた高強度コン



**図-9** 水セメント比 W/C-割裂引張強度



**図-10** 水セメント比 W/C-圧縮強度



**図-11** 圧縮強度<sup>2/3</sup>-割裂引張強度

- クリートのヤング係数の推定, 土木学会論文集, No.739/V-60, pp.279-284, 2003.8.
- 4) 河本健三, 河野博幸, 三村陽一, 吉武 勇：高炉セメントを用いた若材齢コンクリートの引張強度とヤング係数, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.443-448, 2006.7.
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造成能照査編]，2002.3.